

陕北低阶烟煤回转热解反应特性

赵宁, 刘东, 赵锰锰, 张智琛, 项在金

(中国石油大学(华东)化学工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:针对陕北低阶烟煤在回转式反应器中的中低温热解过程,考察热解温度、粒径等级、回转速率对粉煤热解反应规律的影响。结果表明:相比于粒径和回转速率,热解温度对热解规律的影响最为显著;随着热解温度升高,半焦产率降低,半焦中挥发分明显减少;焦油产率先增大后减小;热解气中 H_2 体积分数增加, CH_4 体积分数减少;煤样粒径为 3~4 mm 时,热解焦油产率达 8.48%;粒径变化在一定程度上影响半焦和热解气的产物分布与性质;提高回转速率有利于挥发分的析出,焦油和热解气产率有所增加;煤粒热解粉化程度随着热解温度升高、煤样粒径增大、回转速率提高而加剧;过高的回转速率会导致热解焦油中机械杂质含量增大,恶化产物性质。

关键词:低阶煤; 回转热解; 粒径; 产物分布

中图分类号:TQ 536 **文献标志码:**A

引用格式:赵宁,刘东,赵锰锰,等. 陕北低阶烟煤回转热解反应特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(3):167-175.

ZHAO Ning, LIU Dong, ZHAO Mengmeng, et al. Rotary pyrolysis characteristic of low rank coal from northern Shaanxi[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2019,43(3):167-175.

Rotary pyrolysis characteristic of low rank coal from northern Shaanxi

ZHAO Ning, LIU Dong, ZHAO Mengmeng, ZHANG Zhichen, XIANG Zaijin

(College of Chemical Engineering in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract:The effect of pyrolysis temperature, particle size, rotation speed on rotary pyrolysis characteristic and products distribution of low rank coal from northern Shaanxi was investigated in a rotary furnace reactor. It is found that the temperature show significant influence on the yields of semicoke compared to particle size, rotation speed. With the increasing of temperature, the char yield decreases and the volatile of semicoke decreases significantly. And the tar yield increases first and then decreases. Also, the volume fraction of H_2 increases while CH_4 decreases in pyrolysis gas. The tar yield increases up to 8.48% when the particle size is 3-4 mm. It is concluded that the particle size present the effect to some extent on the distribution and properties of semicoke and pyrolysis gas. Increasing the rotation speed is beneficial to the devolatilization, the yield of tar and pyrolysis gas increase as well. The pulverization degree of low rank coal increases with the improvement of the temperature, particle sizes and rotation speed. And the excessive rotation speed leads to high mechanical impurities content, which makes product properties worsen.

Keywords: low rank coal; rotary pyrolysis; particle size; product distribution

陕北地区煤炭资源丰富^[1],主要为长焰煤、不黏煤和弱黏煤,具有特低灰、特低硫和高发热量的特点,是优质的热解原料煤和化工用煤^[2]。通过热解

技术提取低阶煤中的焦油和热解气是实现陕北地区低阶煤资源梯级分质利用的有效途径^[3-5]。煤热解是煤炭燃烧、液化、气化和干馏的基础反应过程^[6],

收稿日期:2018-10-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0602500)

作者简介:赵宁(1972-),男,高级工程师,博士研究生,研究方向为煤化工与煤基新材料。E-mail:zhaoning0411@163.com。

通信作者:刘东(1972-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为石油与天然气加工、新能源与可再生能源。E-mail:liudong@upc.edu.cn。

不同反应器类型、不同热解条件下揭示低阶煤热解的影响规律是研究热点^[7-18]。石振晶等^[7]采用固定床热解反应器研究淮南烟煤不同条件下的热解特性,采用柱层析和 GC-MS 分析,得到焦油组成及成分随热解温度的变化规律。高超等^[8]研究不同热解气氛和催化剂对粒径为 0.2 ~ 0.5 mm 长焰煤热解产物分布和焦油品质的影响,表明模拟气氛和催化剂可以有效提高轻质焦油产率。石勇等^[9]采用固定床反应器研究神木烟煤和桦甸油页岩共热解对产物分布和焦油品质的影响,表明共热解有助于提高轻质油的含量和产率。Fidalgo 等^[10]采用固定床反应器研究热解气氛对南非煤热解产物产率的影响,发现相比在 N₂ 气氛中,焦油产率和气体产率在 H₂/CO 气氛中均有所增加。Ahmad 等^[11]在固定床反应器中研究不同粒径油页岩的热解特性,指出随着油页岩粒径的减小,页岩油收率逐渐降低。延长石油开发的 CCSI 工艺,将煤热解和气化结合,可实现陕北低阶煤的热解分级利用^[12]。与固定床反应器相比,回转式反应器在热解过程中传热均匀,对物

料的适应性强,且可以方便调节物料在反应器内的停留时间及混合强度。笔者以陕北低阶粉煤为原料,考察在回转炉热解反应器中温度、粒径、回转速率对低阶粉煤回转热解产物产率的影响,分析热解产物分布的影响因素。

1 实验

1.1 原料

低阶粉煤取自于陕西神木红柳林煤矿。煤样经破碎、筛分后选取粒径为 0.5 ~ 6 mm 的煤样进行热解实验。实验前煤样在 105 °C 干燥 4 h 后保存于干燥器中待用。按照 GB/T 212-2008 测定煤样的工业分析,采用德国 Elementar 元素分析仪(Various EL cube)分析煤样的元素组成,按照 GB/T 1341-2007 测定干馏焦油产率,结果见表 1。其中 A 为灰分;V 为挥发分;FC 为固定碳;下标 d 为干燥基;下标 daf 为干燥无灰基。由表 1 可知,煤样具有低灰、低硫、较高挥发分的特点。

表 1 煤样的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses for coal sample

工业分析/%			元素质量分数/%					焦油产率/
A _d	V _d	FC _d	C _{daf}	H _{daf}	S _{daf}	N _{daf}	O _{daf}	%
5.70	33.76	60.54	83.24	4.69	0.34	1.01	10.72	9.73

注:①元素分析根据元素质量平衡测定;②焦油产率由 Gray-King 分析法测定。

1.2 实验装置和实验方法

1.2.1 实验装置

回转热解反应装置如图 1 所示,以合肥科晶材料有限公司研制的 OTF 系列回转实验装置作为热解反应系统,其他还包括供气系统、产物冷凝冷却和产物

收集系统等。回转装置的石英反应管内径 60 mm,管长 1 200 mm,其中反应部分内径 100 mm,长度 400 mm,前后端均采用法兰密封防止气体泄漏并用可旋转接头进行连接。反应器出口缠绕加热带和石棉布保温以防止焦油在此过度冷凝。

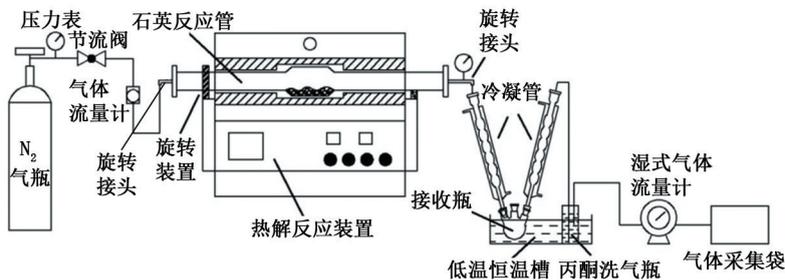


图 1 回转热解实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rotary pyrolysis experimental system

1.2.2 实验方法

热解气氛 N₂ 通过流量调节阀控制进入回转热解反应器中的流量(1 000 mL/min),气体流量计实时显示 N₂ 流量。实验时,称取 120 g 煤样(粒径为

0.5 ~ 6 mm)放入回转热解反应炉反应管中,通入热解气氛 N₂ 10 min 后,开启反应管旋转系统(回转速率为 1 ~ 8 r/min),以 10 °C/min 的升温速率升至预设温度(500 ~ 750 °C,间隔为 50 °C)并保持 30 min。

热解气相依次通过两级冷凝管和接收瓶冷凝热解气,未冷凝的热解气通入丙酮洗气瓶中吸收,不可凝热解煤气经湿式流量计测定后收集于集气袋中。湿式流量计测定反应装置出来的气体总体积,并用气相色谱分析气体组成。实验结束后,用脱脂棉擦净反应管壁末端附着的焦油。用丙酮浸泡洗涤脱脂棉,冲洗冷凝管、接收瓶和整个装置管线,并与丙酮洗气瓶中的溶液混合,用旋转蒸发仪除去大部分丙酮,随后置于 40 °C 烘箱除去剩余丙酮,称量得到焦油质量。热解生成的半焦称量、粒径筛分、收集,保存于干燥器中待用。对热解所得半焦进行筛分,获得小于原粒级和 0.5 mm 粒径范围的颗粒质量占半焦质量的比例。每组实验重复 3 次,以保证实验数据的准确性和精度。

1.2.3 产物分析

利用美国 Agilent 7890A 模拟蒸馏分析焦油馏程;利用美国 Agilent 7890B-5977B 型 GC-MS 气相色谱质谱联用仪分析焦油的族组成。利用美国 Agilent GC 7890A 气相色谱仪检测热解气体各组分,分析其中 CO、CO₂、H₂、CH₄ 及 C₂-C₃ 等;根据载气 N₂ 体积和气相色谱仪检测的各气体体积分数计算出各组分实际体积,从而计算出各气体组分的产率。利用德国 Elementar 元素分析仪 (Various EL cube) 分析焦油和半焦的元素组成。

2 结果分析

2.1 热解温度的影响

在煤样粒径为 1~3 mm、载气流速为 1000 mL/min、升温速率为 10 °C/min、回转速率为 2 r/min、保温时间为 30 min 的条件下,分别考察温度对低阶粉煤热解特性的影响。

2.1.1 热解温度对热解产物分布的影响

热解温度对低阶粉煤回转热解产物产率的影响规律如图 2 所示。由图 2 可知:在 500~750 °C 内,随着热解温度升高,煤有机大分子受热分解,分子结构中的弱键断裂以及小分子侧链脱落,焦油和热解气产率增加^[19];在 700 °C 时,焦油产率达到最大值 8.49%,为格金理论焦油产率的 87.3%;热解过程伴随着焦油二次裂解生成小分子气体,温度超过 700 °C 后焦油产率开始下降;由于升温速率为 10 °C/min 的较慢热解速率,焦油在较低的温度时已经析出大部分,导致温度对焦油产率的影响较为有限,最大产率仅比最小产率高 0.31%。热解终温越高,挥发分的析出越彻底,所以半焦的产率随温度的提

高而下降,由 78.85% 降低至 70.68%;热解气产率与半焦产率呈现相反的变化趋势,热解气产率随着温度的升高显著提高,由 7.97% 增加至 15.85%。这说明热解气的增加主要是由焦油的二次裂解及半焦的气化反应引起的;低阶煤回转热解过程中的气相产物中夹带较多的细微粉尘,导致所得焦油中机械杂质含量较高,约为焦油产量的 2%。低阶煤热解过程中的粉尘主要来源于入炉煤中原本存在的细微颗粒及热解过程中固体颗粒磨损、热爆和表面脱落形成的细小焦粉和煤灰颗粒;粉尘含量大,后期油尘难分离、焦油品质差等技术难题,是目前已有低阶粉煤热解工艺面临的重大问题^[20]。根据石振晶^[7]和王鹏^[21]等的研究,热解水的产率变化比较复杂,与热解温度没有必然的联系。

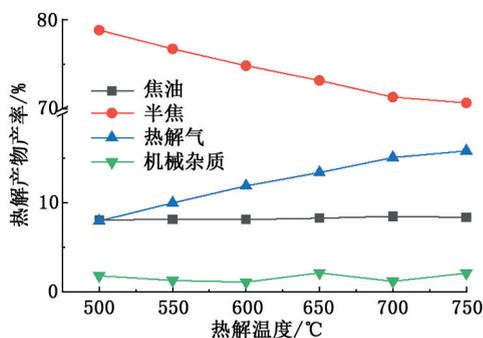


图 2 热解温度对热解产物产率的影响

Fig. 2 Effect of temperature on yields of pyrolysis products

2.1.2 热解温度对热解气组分的影响

热解温度对低阶粉煤热解气体组分的影响规律如图 3 所示。热解气体各组分的生成与低阶煤中所含官能团的裂解有关,在温度的影响下含氧官能团、羟基、醚键、脂肪侧链等发生裂解;H₂ 来源自煤中芳香烃结构脱氢缩聚反应,CO 和 CO₂ 与煤中羧基和含氧杂环有关,而 C₂H_n 等轻质烃类产物主要由烷基侧链、含亚甲基的脂链或脂环断裂产生^[22]。由图 3 可知,CH₄、H₂、CO 及 CO₂ 是低阶粉煤热解过程中的主要气态产物。当温度由 500 °C 升高到 750 °C 时,H₂ 和 CO 产率升高,CH₄、CO₂ 及 C₂H_n 产率减少。H₂ 的体积分数由 17.52% 增加到 54.2%,CO 的体积分数由 11.26% 增加到 13.13%。低阶煤热解主要是吸热反应,温度的升高有利于 H₂、CO 等小分子气体的生成。CH₄、CO₂ 及 C₂H_n 的体积分数分别由 38.34%、14.87%、7.69% 减少到 20.45%、7.03%、2.32%。低阶煤低温热解气中的 CH₄ 主要归于低阶煤中脂肪侧链断裂。CO₂ 主要是低温炭化

阶段的产物,半焦和 CO₂ 在高温条件下发生还原反应,使得 CO 含量增加,半焦产率下降。

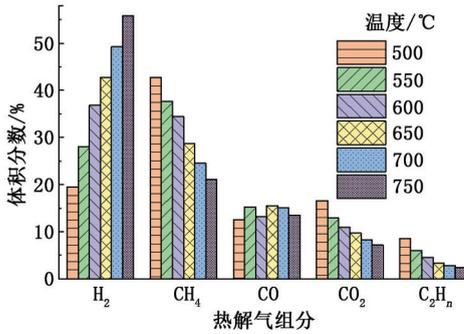


图3 热解温度对热解气组分的影响

Fig. 3 Effect of temperature on pyrolysis gas composition

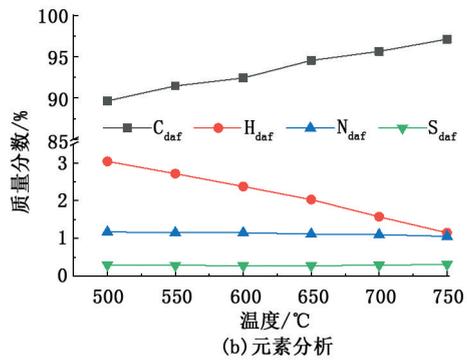
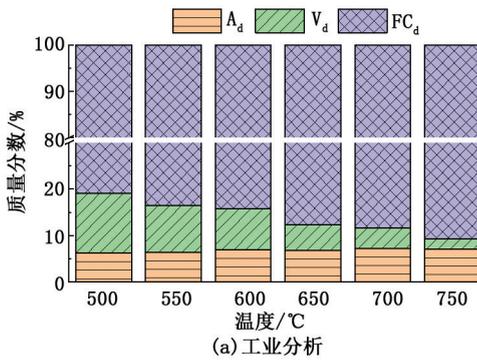


图4 温度对热解半焦工业分析和元素分析的影响

Fig. 4 Effect of temperature on proximate and ultimate analyses of semicoke

图5 为不同热解温度下热解破碎粉化后半焦的粒径变化。由图5可知,热解温度对陕北低阶粉煤

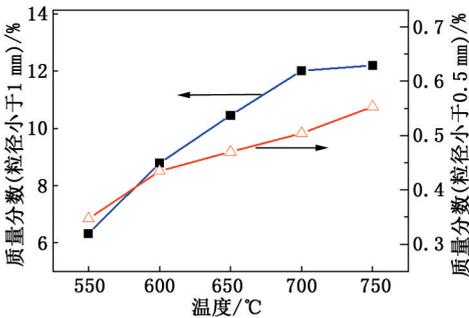


图5 温度对低阶粉煤粉化程度的影响

Fig. 5 Effect of temperature on pulverization of coal simple

煤样破碎粉化影响较明显。随着热解温度升高,煤中挥发分不断析出,小于1和0.5 mm粒级的半焦质量分数分别从6.32%、0.35%增加至12.20%、0.55%。显然,随着热解温度提高,小粒径半焦颗粒的质量分数增大,粉化程度提高。煤样颗粒内部的温度梯度随热解温度升高而变大,煤样颗粒内部和

2.1.3 热解温度对半焦特性的影响

不同热解温度低阶粉煤热解所得半焦的工业分析和元素分析如图4所示。结果表明,随着热解温度的升高,煤热解程度加深,半焦的挥发分含量减少幅度明显,灰分和固定碳含量增加。此外,随热解温度升高半焦中C含量显著增大,H含量和H/C原子比明显降低,显示半焦不断缩聚,芳香化程度增大的趋势。热解温度升高,CO、CO₂、H₂O及焦油等含氧物质的逸出,导致半焦中O元素随之急剧下降。由于N元素的释放速率高于其他挥发分释放速率,导致半焦中氮含量降低。半焦全S含量基本处于0.28%~0.31%,说明热解温度对半焦全硫含量影响不大。650 °C之后S含量略有增加与有机质和碱性矿物质的固硫作用有关^[23]。

外部热应力增加。随着热解温度升高,煤中活性组分裂解反应加剧,挥发分析出速率增大,导致煤样破碎粉化程度加剧。

2.2 煤样粒径的影响

煤样粒径是影响孔隙率的主要因素之一,孔隙率通过传质、传热和二次反应影响加热速率和挥发分从煤内逸出速率^[24]。在热解温度650 °C、载气流速1000 mL/min、升温速率10 °C/min、回转速率2 r/min、保温时间30 min的条件下,考察煤样粒径(0.5~6 mm)对低阶粉煤热解特性的影响。

2.2.1 粒径对热解产物分布的影响

不同煤样粒径对低阶煤热解产物分配规律的影响如图6所示。由图6可知,随着煤样粒径增大,热解焦油的产率呈现先增加后减少的趋势;半焦产率和热解气产率随粒径的变化则与焦油相反,呈先减少后增大的趋势,煤样粒径为3~4 mm半焦产率达到最小值73.46%。煤样粒径为0.5~1 mm时,床层堆积紧密,挥发分从颗粒间逸出的阻力较大,增加挥发分在颗粒外部的二次反应程度,焦油产率降低。

由于不同的煤岩组成可磨性不同,矿物质颗粒易富集于较小颗粒煤样中,导致其惰性组分含量增加,热解过程中挥发分减少^[25]。当煤样粒径增大到5~6 mm时,挥发分由煤样颗粒内部向外逸出阻力增大,颗粒内部二次反应程度增加,导致挥发分组成发生变化,气态产物产率增加,焦油产率降低。热解产物产率是床层堆积、受热温差、煤岩组成等多种因素互相竞争的结果。回转热解焦油中机械杂质随着煤样粒径的增大而减少,煤样粒径为5~6 mm时机械杂质最低为2.02%。常赵刚等^[26]研究发现升温速率和粒径是影响褐煤粉化的主要因素,为减少粒径低于0.5 mm细粉的产生,褐煤热解工业生产过程中应选取粒径高于1.0 mm的煤颗粒。

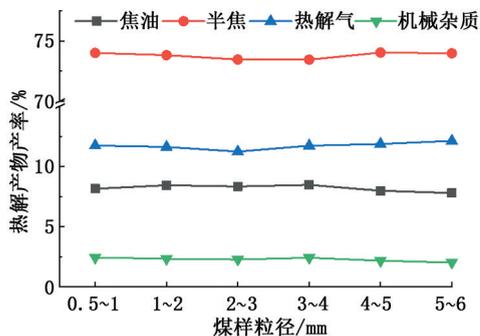


图6 粒径对热解产物产率的影响

Fig. 6 Effect of particle size on yields of pyrolysis products

2.2.2 粒径对热解气组分的影响

煤样粒径对低阶粉煤热解气体组分的影响规律如图7所示。由图7可知,随着煤样粒径范围的增大,热解气中H₂、CO的体积分数先减少后增大,CO₂、C₂H_n的体积分数先增大后减小,CH₄的体积分数逐渐增大。煤样粒径为0.5~3 mm时,煤样床层

的孔隙率低,床层阻力大,反应动力学在煤样热解过程中起主要作用。挥发分从床层逸出过程中,CO₂与C反应生产CO,C₂H_n分解为CH₄、H₂等小分子。煤样粒径为3~6 mm时,随着煤样粒径增大,床层孔隙率增大,热解气体在煤粉颗粒中的扩散速度起决定作用,挥发分从颗粒内部向外逸出过程中发生分解反应,H₂、CH₄、CO等小分子物质体积分数增加,但CH₄的体积分数增幅甚微。

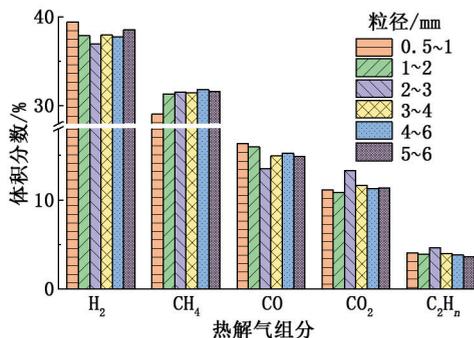


图7 粒径对热解气组分的影响

Fig. 7 Effect of particle size on pyrolysis gas composition

2.2.3 粒径对半焦特性的影响

不同粒径下低阶粉煤热解所得半焦的工业分析和元素分析如图8所示。结果表明,随着粒径的增大,半焦中的灰分和挥发分含量先减小后增加,固定碳含量先增大后减小。在相同的热解温度下,粒径较小的煤样中惰性组分相对含量高,且热解过程中外扩散阻力大于内扩散阻力,较小粒径不利于挥发分的彻底脱出。Saxena等^[27]研究发现,煤样颗粒较大时,其内外表面存在径向温度差,挥发分从大颗粒中脱出的时间更长,导致部分挥发分难以完全析出。煤样粒径从0.5~1 mm增大到5~6 mm时,半焦中C元素含量先增大后降低,粒径2~3 mm时最高。

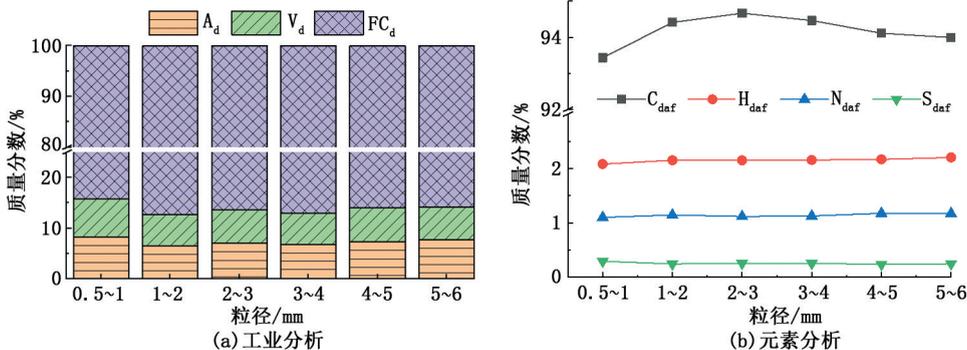


图8 粒径对热解半焦工业分析和元素分析的影响

Fig. 8 Effect of particle size on proximate and ultimate analyses of semicoke

图9是不同粒径下低阶粉煤热解破碎粉化后半焦的粒径变化情况。由图9可知,热解粉化后的半焦粒级主要集中在原粒级内;随着加样粒级的增加,原粒级半焦质量分数减小,小于原粒级和0.5 mm粒级的半焦质量分数分别从12.43%、0.40%增加到32.65%、0.96%。表明随着煤样粒径增大,热解过程中部分煤样受到热力和物理摩擦作用,内部破碎为小于原粒级的颗粒,外部剥落为小于0.5 mm粒级的颗粒;同时随着煤样粒径的增大,煤样破碎粉化程度加剧,越小的煤样粒级热稳定性越好,越不容易发生粒径变化。当煤样粒径为0.5~1 mm时,粒径小于0.5 mm的半焦质量分数高达18.05%;为降低后续油尘分离难度,低阶粉煤热解工业生产过程中应尽量选取粒径大于0.5 mm的煤颗粒。

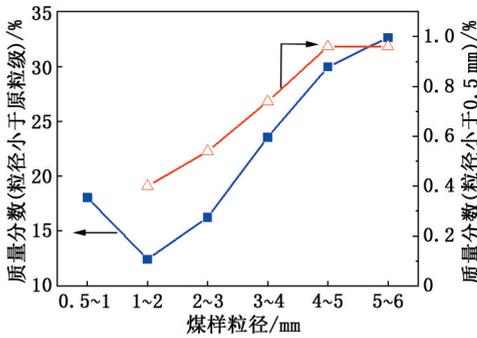


图9 粒径对低阶粉煤粉化程度的影响

Fig.9 Effect of particle size on pulverization of coal simple

2.3 回转速率的影响

在煤样粒径1~3 mm、热解温度650℃、载气流速1000 mL/min、升温速率10℃/min、保温时间30 min的条件下,考察回转速率对低阶粉煤热解特性的影响。

2.3.1 回转速率对热解产物分布的影响

回转速率对低阶粉煤热解产物分布的影响如图10所示。由图10可知,热解终温相同时,提高回转速率,煤样在热解过程中能够快速、充分混合,传热效果不断增加,有利于挥发分的析出,半焦产率降低,焦油产率和热解气产率增加。回转热解反应管内部的扬料板使得回转热解过程中煤样不断搅动,煤层孔隙率增大,减少焦油在逸出过程中的二次分解的机会,焦油产率增加。随着回转速率提高,煤样运动加剧,挥发分中粉尘夹带逐渐加剧,导致热解焦油中机械杂质含量增加。

2.3.2 回转速率对热解气组分的影响

回转速率对低阶粉煤热解气体组分的影响规律如图11所示。由图11可知,随着回转速率提高,热

解气中H₂的体积分数逐渐减小,CH₄的体积分数先增大后减小,CO和C₂H_n的体积分数先减少后增大、CO₂的体积分数增幅较小。

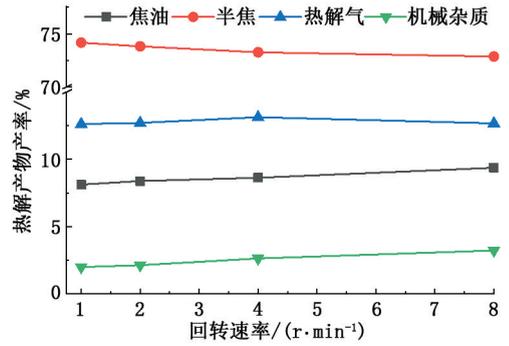


图10 回转速率对热解产物产率的影响

Fig.10 Effect of rotation speed on yields of pyrolysis products

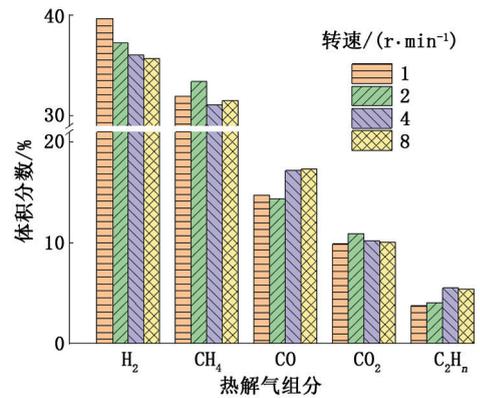


图11 回转速率对热解气组分的影响

Fig.11 Effect of rotation speed on pyrolysis gas composition

2.3.3 回转速率对半焦特性的影响

不同回转速率下低阶粉煤热解所得半焦的工业分析和元素分析如图12所示。结果表明,随着回转速率的提高,半焦中的挥发分减少,灰分和固定碳含量增加。除C、H元素有所增加外,回转速率对半焦N、S元素影响不明显。

图13为不同转速下低阶粉煤热解破碎粉化后半焦的粒径变化。由图13可知,回转速率由1 r/min升高至8 r/min过程中,煤样破碎程度呈增大趋势;小于1和0.5 mm粒级的半焦质量分数分别从5.25%增加到6.81%,小于0.5 mm粒级的半焦质量分数从0.44%增加到0.69%,表明提高回转速率能显著改变半焦的粒径组成。工业生产中,增大回转设备筒体的转速,不仅可以提高产油率,同时可以对反应设备内物料进行混合和输送;但过高的回转速率将导致细颗粒的产生量增加,不利于后续油尘

分离。

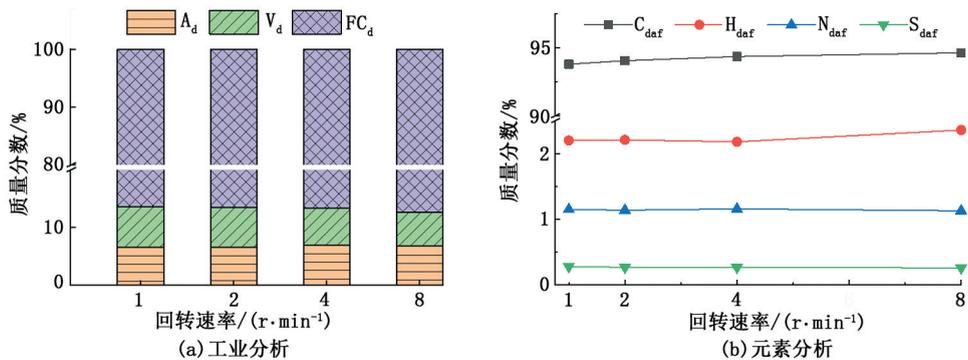


图12 回转速率对热解半焦工业分析和元素分析的影响

Fig. 12 Effect of rotation speed on proximate and ultimate analyses of semicoke

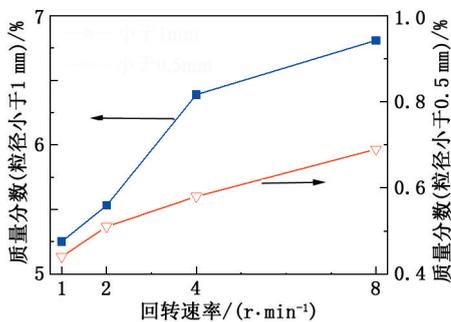


图13 回转速率对低阶粉煤粉化程度的影响

Fig. 13 Effect of rotation speed on pulverization of coal sample

3 结论

(1) 陕北低阶粉煤回转热解反应过程中, 随热解温度的升高, 半焦产率降低, 焦油产率先增大后减小, 700 °C 时产率最高; 热解气产率增加, H_2 体积分数增加, CH_4 体积分数减少; 半焦中挥发分含量明显减少。

(2) 粒径从 0.5 ~ 1 mm 增加到 5 ~ 6 mm, 随着煤样粒径增大, 焦油产率先增加后减少, 煤样粒径为 3 ~ 4 mm 时焦油产率达到最大值 8.48%; 半焦和热解气产率随粒径的变化与焦油相反; 热解气中 H_2 、CO 的体积分数先减少后增大, CO_2 、 C_2H_n 的体积分数先增大后减小, CH_4 的体积分数逐渐增大但增幅甚微。

(3) 增大回转速率, 煤样运动加剧, 煤层孔隙率增大, 有利于挥发分的析出, 焦油和热解气产率均有所增加。

(4) 随着热解温度升高、粒径增大、回转速率提高, 煤粒热解粉化程度加剧。低阶粉煤回转热解焦油中粉尘含量较高, 热解焦油中机械杂质随着热解温度升高、煤样粒径减小、回转速率增大而增加, 热

解所得焦油机械杂质含量超过 2%。

参考文献:

- [1] 张旭梅, 吴浩英, 李玮娜. 陕西省煤炭资源储量概况分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2015(6): 200, 210.
ZHANG Xumei, WU Haoying, LI Weina. The situation analysis of Shaanxi Province coal reserves [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2015(6): 200, 210.
- [2] 申涛, 林平选, 张晓团, 等. 陕北能源化工基地资源特征与环境承载力[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(10): 37-40.
SHEN Tao, LIN Pingxuan, ZHANG Xiaotuan, et al. Northern Shaanxi energy chemical industry base resource characteristics and environmental bearing capacity [J]. Coal Geology of China, 2015, 27(10): 37-40.
- [3] 尚建选, 王立杰, 甘建平. 陕北低变质煤分质综合利用前景展望[J]. 煤炭转化, 2011, 34(1): 92-96.
SHANG Jianxuan, WANG Lijie, GAN Jianping. Prospect of the Shanbei comprehensive coal grading utilization technology [J]. Coal Conversion, 2011, 34(1): 92-96.
- [4] 潘生杰, 陈建玉, 范飞, 等. 低阶煤分质利用转化路线的现状分析及展望[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(5): 7-12.
PAN Shengjie, CHEN Jianyu, FAN Fei, et al. Present situation analysis and prospect of low rank coal quality-based utilization conversion route [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 7-12.
- [5] 王向辉, 门卓武, 许明, 等. 低阶煤粉煤热解提质技术研究现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(6): 36-41.
WANG Xianghui, MEN Zhuowu, XU Ming, et al. Research status and development proposals on pyrolysis techniques of low rank pulverized coal [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 36-41.
- [6] 霍鹏举. 低阶煤的分质利用技术现状及发展前景[J].

- 应用化工, 2018, 47(10): 2287-2291.
- HUO Pengju. Development and prospect of low-rank coal staged utilization technology [J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(10): 2287-2291.
- [7] 石振晶, 夏芝香, 方梦祥, 等. 淮南烟煤热解及焦油析出特性[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(1): 58-64.
- SHI Zhenjing, XIA Zhixiang, FANG Mengxiang, et al. Pyrolysis behavior of Huainan bituminous coal and formation characteristic of tar [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(1): 58-64.
- [8] 高超, 马风云, 马空军, 等. 热解气氛对煤催化热解焦油品质的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1956-1962.
- GAO Chao, MA Fengyun, MA Kongjun, et al. Effect of pyrolysis gas on the tar quality from coal catalytic pyrolysis [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1956-1962.
- [9] 石勇, 赖登国, 陈兆辉, 等. 神木烟煤与桦甸油页岩的共热解特性[J]. 过程工程学报, 2016, 16(4): 634-638.
- SHI Yong, LAI Dengguo, CHEN Zhaohui, et al. Co-pyrolysis characteristics of Shenmu bituminous coal and Huadian oil shale [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(4): 634-638.
- [10] FIDALGO B, NIEKERK D V, MILLAN M. The effect of syngas on tar quality and quantity in pyrolysis of a typical South African inertinite-rich coal [J]. Fuel, 2014, 134(9): 90-96.
- [11] AHMAD N, WILLIAMS P T. Influence of particle grain size on the yield and composition of products from the pyrolysis of oil shales [J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 1998, 46(1): 31-49.
- [12] 王宁波, 黄勇. 粉煤加压热解-气化一体化技术(CCSI)的研究开发及工业化试验[J]. 煤化工, 2018, 46(1): 6-9, 40.
- WANG Ningbo, HUANG Yong. Research development and industrial test of pulverized coal pressurized to coal-tar and syngas integration (CCSI) technology [J]. Coal Chemical Industry, 2018, 46(1): 6-9, 40.
- [13] GAO Z, ZHENG M, ZHANG D, et al. Low temperature pyrolysis properties and kinetics of non-coking coal in Chinese western coals [J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 89(4): 544-559.
- [14] 迟姚玲, 李术元, 岳长涛, 等. 昭通褐煤及其低温热解产物的性质研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(2): 101-103.
- CHI Yaoling, LI Shuyuan, YUE Changtao, et al. Properties of Zhaotong lignite and its pyrolysis products [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(2): 101-103.
- [15] LIU J, JIANG X, SHEN J, et al. Influences of particle size, ultraviolet irradiation and pyrolysis temperature on stable free radicals in coal [J]. Powder Technology, 2015, 272: 64-74.
- [16] SONG H, LIU G, ZHANG J, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of low rank coals by TG-FTIR method [J]. Fuel Processing Technology, 2017, 156: 454-460.
- [17] 叶胜林, 马晓波, 陈德珍, 等. 回转窑转速对废塑料热解产物特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3952-3958.
- YE Shenglin, MA Xiaobo, CHEN Dezhen, et al. Influence of rotating speed on pyrolysis products of waste plastics in rotary kiln [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3952-3958.
- [18] 林元奎, 边潇潇, 李青松. 褐煤提质联产油工艺的数值模拟与分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 180-186.
- LIN Yuankui, BIAN Xiaoxiao, LI Qingsong. Numerical simulation and exergy analysis of liquid from coal process [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(4): 180-186.
- [19] SOLOMON P R, FLETCHER T H, PUGMIRE R J. Progress in coal pyrolysis [J]. Fuel, 1993, 72(5): 587-597.
- [20] 白效言, 张颺, 王岩, 等. 低阶煤热解关键技术问题分析及研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 192-198.
- BAI Xiaoyan, ZHANG Yang, WANG Yan, et al. Analysis of key issues and research progress in pyrolysis of low rank coal [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 192-198.
- [21] 王鹏, 文芳, 步学朋, 等. 煤热解特性研究[J]. 煤炭转化, 2005, 28(1): 8-13.
- WANG Peng, WEN Fang, BU Xuepeng, et al. Study on the pyrolysis characteristics of coal [J]. Coal Conversion, 2005, 28(1): 8-13.
- [22] 朱学栋, 朱子彬, 韩崇家, 等. 煤的热解研究(III): 煤中官能团与热解生成物[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2000, 26(1): 14-17.
- ZHU Xuedong, ZHU Zibin, HAN Chongjia, et al. Fundamental study of coal pyrolysis (III): functional group and pyrolysis products [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2000, 26(1): 14-17.
- [23] KARACA S. Desulfurization of a Turkish lignite at various gas atmospheres by pyrolysis: effect of mineral matter [J]. Fuel, 2003, 82(12): 1509-1516.
- [24] CUI L J, LIN W G, YAO J Z. Influences of temperature

- and coal particle size on the flash pyrolysis of coal in a fast-entrained bed [J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2006, 22(1):103-110.
- [25] 吕太,张翠珍,吴超. 粒径和升温速率对煤热分解影响的研究[J]. *煤炭转化*, 2005, 28(1):17-20.
LÜ Tai, ZHANG Cuizhen, WU Chao. Study on the effect of coal diameter and heating rate on the coal pyrolysis [J]. *Coal Conversion*, 2005, 28(1):17-20.
- [26] 常赵刚,王利斌,裴贤丰,等. 蒙东褐煤固定床热解破碎粉化特性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(11): 215-221.
CHANG Zhaogang, WANG Libin, PEI Xianfeng, et al. Study on pulverization characteristics of east Inner Mongolia lignite during pyrolysis in a fixed bed [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(11):215-221.
- [27] SAXENA S C. Devolatilization and combustion characteristics of coal particles [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 1990, 16(1):55-94.

(编辑 刘为清)